

Protein anaerobic treatment through an UASB reactor

Nancy Rincón, Irene Cabrera, Nola Fernández, Elsa Chacín y Altamira Díaz

División de Estudios para Graduados, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela

Abstract

An UASB upflow anaerobic sludge blanket reactor of 4.5 liters was studied under mesophilic conditions to treat synthetic wastewater composed by protein (caseine). The effluent flow rate was 8.3 l/d and the hydraulic retention time was 12 hours. The reactor was inoculated with grain sludge from a brewery. The organic load range was 2-8 Kg DQO/m³ d, equivalent to a total DQO in the effluent of 1000 - 4000 mg/l. During the experiment, the following parameters were monitored: pH, Temperature, Alkalinity, Biogas Production, Methane Content, Chemical Oxygen Demand, Volatile Fatty Acids Production, and Suspended Solids. The experimental results showed that the best behavior of the system was achieved when the effluent DQO was 4000 mg/l, in which the total DQO removal was 91.91% with a methane content at about 10.4 l/d (STP). The methane yield was 0.34 m³ CH₄/ Kg DQO removed

Key words: Anaerobic treatment, protein, UASB reactors, mesophilic conditions.

Tratamiento anaerobio de proteína mediante un reactor UASB

Resumen

Un reactor anaerobio de manto de lodo de flujo ascendente UASB de 4.5 l fue estudiado bajo condiciones mesofílicas, al tratar agua residual sintética compuesta por caseína (proteína). La tasa de flujo del influente fue de 8.3 l/d y el tiempo de retención hidráulico de 12 horas. El reactor fue inoculado con un lodo granular proveniente de una cervecería. El rango de cargas orgánicas aplicadas fue 2-8 Kg DQO/m³d, equivalente a una DQO total en el afluente de 1000-4000 mg/l. Durante la experimentación fueron registrados los siguientes parámetros: pH, Temperatura, Alcalinidad, Producción de Biogas, Contenido de Metano, Demanda Química de Oxígeno, Producción de Ácidos Grasos Volátiles y Sólidos Suspendedos. Los resultados experimentales mostraron que el mejor comportamiento del sistema fue logrado cuando la DQO del afluente fue de 4000 mg/l, correspondiente a una carga orgánica de 8 Kg DQO/ m³ d, obteniéndose una remoción de DQO total del 91.91% con un contenido de metano de 10.4 l/d (STP). La producción de metano fue de 0.34 m³ CH₄/Kg DQO removida.

Palabras clave: Tratamiento anaerobio, proteínas, reactores UASB, condiciones mesofílicas.

Introducción

Actualmente el tratamiento de aguas residuales está siendo aceptado como una tecnología simple para tratar gran variedad de aguas residuales. Desde la introducción del filtro anaerobio [1], se han desarrollado un número de procesos

de tratamiento anaerobio de aguas residuales, entre ellos el manto de lodo de flujo ascendente conocido como reactor UASB [2, 3, 4]. De los diferentes sistemas de tratamiento, el reactor anaerobio de manto de lodo de flujo ascendente (UASB), tiene una gran aplicación [5]. Más de 300 reactores UASB a escala real están siendo opera-

dos satisfactoriamente. Esta tecnología ha sido aplicada en diversas industrias como fábricas de cerveza, de almidón de maíz, de papeles, destiladoras de alcohol, etc.

En Venezuela se encuentra vigente la Ley Penal del Ambiente, la cual obliga a las industrias a realizar tratamiento de sus efluentes en plantas de tratamiento propias, compartidas o municipales. El Reactor Anaerobio de Manto de Lodo con Flujo Ascendente (UASB) es una opción que presenta grandes ventajas para el tratamiento de altas cargas orgánicas y producción de energía (gas metano), que podría ser usada para otros fines. El objetivo de este trabajo fue determinar la eficiencia de remoción de DQO en un reactor UASB, bajo diferentes cargas orgánicas, con un sustrato sintético de proteína y bajo condiciones mesofílicas; y, a la vez, obtener un registro de diferentes parámetros operacionales como pH, alcalinidad, DQO, sólidos suspendidos y ácidos grasos volátiles que permitan analizar su comportamiento, esperando obtener altas eficiencias de remoción y altos porcentajes de metano al aumentar las cargas orgánicas.

Materiales y Métodos

Descripción de las unidades de laboratorio

Durante la investigación fue utilizado un reactor UASB, el cual fue diseñado con una capacidad de 4 l (Figura 1). Este fue inoculado con un lodo granulado obtenido de la Planta Polar Caracas, cuyo volumen fue 1.2 l, lo cual representó un 30% del volumen del reactor. Las características físicas pueden verse en la Tabla 1.

El reactor operó durante 48 h por carga y después comenzó a funcionar a flujo continuo. Fue sometido a diferentes cargas orgánicas comenzando desde 2 hasta 8 Kg DQO/m³d (Tabla 2), con un tiempo de retención hidráulica de 12 h [6] y una velocidad del flujo de 5.6 ml/min, la cual fue mantenida durante toda la fase experimental. En el fondo del reactor se colocó una pequeña cantidad de grava a manera de proveer una distribución uniforme del flujo, la cual tenía un diámetro aproximado de 3.5 mm, ocupando un volumen de 135 ml y un 3.4% del volumen del reactor.

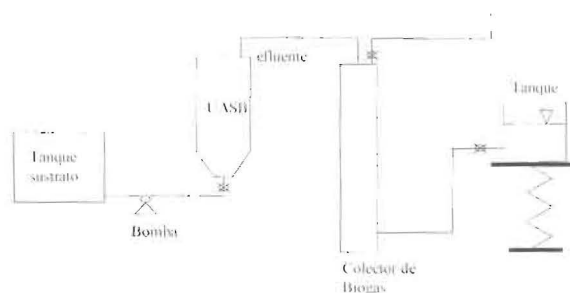


Figura 1 Configuración del Sistema.

Tabla 1
Características Físicas del Reactor

Propiedades	Reactor UASB
Volumen Vacío (ml)	4445
Volumen Activo(ml)	4000
Espacio Tope (ml)	445
Altura Total (cm)	67
Altura Líquida (cm)	55.5
Diámetro Interno (cm)	9.8
Diámetro Externo (cm)	11

Tabla 2
Parámetros Operacionales Aplicados al Reactor UASB durante la Experimentación

DIA	DQO mg/l	Carga Orgánica Kg DQO/m ³ d
1	1000	2
13	1500	3
28	2000	4
44	3000	6
58	4000	8

En la parte superior se colocó un separador gas-sólido (GSS), el cual fue conectado a un colector de biogas. La concentración de sólidos totales en el lodo utilizado como inóculo, fue de 192 Kg/m³ con una concentración de sólidos volátiles de 151.5 Kg/m³. La temperatura en el sistema fue mantenida aproximadamente a 37°C, temperatura óptima para microorganismos mesofílicos.

Tabla 3
Composición del Sustrato utilizado
para Alimentar el Sistema Anaerobio

Constituyente	Concentración de Substrato
Caseína Merk	300 g/l
NH ₄ Cl	0.28 - 2.26 g/l
Caldo lactosado	0.5 g/l
NaHCO ₃	0.5 - 1.0 g/l
KH ₂ PO ₄	0.027 - 0.23 g/l
K ₂ HPO ₄	0.035 - 0.28 g/l
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.13 g/l
MgCl ₂ .6H ₂ O	0.085 g/l
CaCl ₂	0.04 g/l
FeCl ₃ .6H ₂ O	0.73 g/l
NiSO ₄ .6H ₂ O	500 µg/l
MnCl ₂ .4H ₂ O	500 µg/l
ZnSO ₄ .7H ₂ O	500 µg/l
H ₃ BO ₃	100 µg/l
CoCl ₂ .6H ₂ O	50 µg/l
CuSO ₄ .5H ₂ O	5 µg/l
H ₃ PO ₄ .12MoO.24H ₂ O	40 µg/l

Control, muestreo y análisis del sistema

Los parámetros de registro usados para la determinación del comportamiento del reactor UASB fueron: demanda química de oxígeno (DQO), ácidos grasos volátiles (AGV), pH, sólidos suspendidos totales y volátiles (SST, SSV), producción de biogas y contenido de metano. El pH, la alcalinidad, la demanda química de oxígeno y el contenido de sólidos se determinaron siguiendo la metodología descrita en el APHA, AWWA, WPCF [7].

La concentración de los ácidos grasos volátiles (AGV) se determinó utilizando un cromatógrafo de gas Perkin Elmer. Como gas de arrastre se usó nitrógeno, el cual se mantenía a través de la columna a una temperatura constante de 140°C y un caudal de flujo de 28 ml/min. Los componentes que eluían de la columna se detectaron con un ionizador de llama, conectado a un integrador electrónico (PE Nelson modelo 1022). Las muestras a ser analizadas, fueron previamente filtradas

utilizando una membrana de 0.20 µm, el filtrado fue mezclado con ácido fórmico analítico al 10% (V/V), y luego se inyectaron 4 µl.

La producción de biogas total producido se registró por desplazamiento de agua. El gas fue recolectado en un cilindro graduado de medición, conteniendo agua, a la cual se añadió ácido sulfúrico 0.1 N, éste se adicionó con el fin de reducir la solubilidad de dióxido de carbono. Todas las tasas de producción se ajustaron a condiciones estándar de temperatura y presión (273°C/ 760 mm Hg) y expresadas en litros de biogas por día. El porcentaje de metano se midió utilizando el cromatógrafo Perkin Elmer Autosystem con una columna de vidrio empacada W/Hayesep Q 80/100 6' x ¼" x 2 mm Marca Xpertk. El cromatógrafo se operó de modo isotérmico a una temperatura de horno de 150°C y 200°C en el inyector. El gas de arrastre usado, fue nitrógeno a una tasa de flujo de 20 ml/min, el mismo se pasó a través de un filtro purificador de gas, Modelo No. DGP-125-R2. Los compuestos que eluyeron la columna se determinaron y cuantificaron utilizando un detector de ionización a la llama (FID) A 160°. La señal de salida se registró en un integrador electrónico PE NELSON Modelo 1022. La cuantificación del metano se realizó a través del Método Estándar Externo (Punto Simple), el cual consistió en inyectar muestras de estándares de concentraciones conocidas del gas. Los resultados se expresaron en porcentaje de metano.

Agua residual sintética

El sistema se alimentó con agua residual sintética preparada con caseína como proteína. Para solubilizar la caseína Merk fue utilizado hidróxido de sodio como álcali [8]. Para 300 g de caseína Merk se disolvió con 125 ml de NaOH 6 N y luego se adicionó agua destilada hasta completar 2 l, lo que resultó una DQO en el sustrato de 235.690 mg/l y por proporción de volumen se conseguía la cantidad de carbono requerido en el proceso a manera de mantener la misma relación C:N:P de 100:5:1. El nitrógeno se suministró por medio del cloruro de amonio (NH₄Cl) y sulfato de amonio (NH₄)₂SO₄, el fósforo por los compuestos KH₂PO₄, K₂HPO₄, y la alcalinidad fue controlada por el bicarbonato de sodio. La Tabla 3 presenta la composición del sustrato utilizado para alimentar el sistema anaerobio.

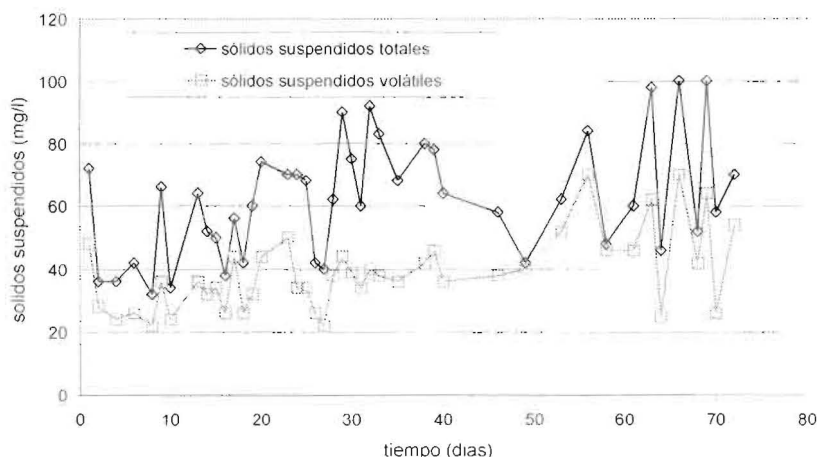


Figura 2. Variación de sólidos suspendidos (mg/l) en el efluente del reactor UASB utilizando proteína como sustrato.

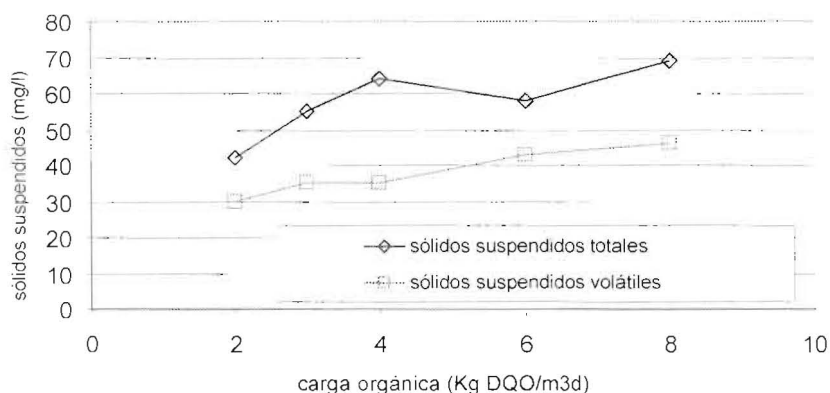


Figura 3. Efecto de la variación de la carga orgánica ($\text{Kg DQO/m}^3 \text{ d}$) en la concentración de sólidos suspendidos en el efluente del reactor UASB usando proteína como sustrato.

Para aumentar la actividad metanogénica, se agregaron a la solución trazas de elementos tales como Ni, Co, Mo, etc. [4]. Todas las sustancias químicas fueron preparadas con soluciones patrones y agregadas para alimentar el sistema a la misma concentración, a lo largo de todo el período de experimentación, excepto el carbono, nitrógeno y fósforo, los cuales fueron variados dependiendo de la carga orgánica.

Resultados y Discusión

Sólidos suspendidos

Durante la experimentación se pudo observar que dependiendo de las diferentes cargas orgánicas aplicadas al reactor, se encontraban variaciones de las concentraciones de los sólidos suspendidos en el efluente (Figuras 2 y 3).

Desde el inicio de la experimentación hasta la carga orgánica de $4 \text{ Kg DQO/m}^3 \text{ d}$ existió un aumento en la concentración de los SST, siendo menor en proporción el aumento de los SSV. Esto indica que existía mayor cohesión en los gránulos, indicando una mayor acumulación de microorganismos en ellos, originando de esta manera gránulos de lodo de muy buena sedimentación (gránulos densos) [9].

Para la carga de $6 \text{ Kg DQO/m}^3 \text{ d}$ la concentración de los sólidos suspendidos disminuyó en el efluente, al mismo tiempo que la diferencia entre los valores de SST y SSV fue la menor encontrada en toda la experimentación. Esto indica que la mayor parte del material sólido estuvo formado por material celular, lo cual significa que la cantidad de nutrientes requeridos era adecuada para la biomasa existente en el sistema de tratamiento, lográndose una actividad enzimática fa-

Tabla 4
Concentración de NaHCO_3 usada
dependiendo de la Demanda Química
de Oxígeno aplicada

DQO g/l	NaHCO_3 g/l	Alcalinidad mg CaCO_3 /l
1.0	0.5	990
1.5	0.8	1441
2.0	0.8	1512
3.0	1.0	1930
4.0	1.0	2000

vorable para la concentración del lodo, por ende para la granulación del mismo, disminuyendo la pérdida de biomasa fuera del sistema.

Para la última carga orgánica aplicada de 8 Kg DQO/ m^3 d, los sólidos comenzaron nuevamente a aumentar con relación a la anterior; esto es debido probablemente a que existía una mayor producción de biogas, creando así condiciones de mezcla en el tope del reactor, lo que originó la salida de los sólidos en el efluente [4].

pH y alcalinidad

El pH en el efluente del reactor UASB siempre se mantuvo en el rango 6.50-7.30, para cualquier valor de carga orgánica usada en el sistema, el rango operacional de pH está comprendido entre 6.60 y 7.60. La adición de un álcali (hidróxido de sodio) necesaria para solubilizar la caseína, ayudó a mantener el pH en un rango aceptable para las bacterias metanogénicas. También se adicionó para este fin bicarbonato de sodio, que además proporciona capacidad amortiguadora al sustrato para neutralizar los ácidos que se forman en el proceso [10]. Este compuesto fue agregado con el sustrato y a medida que se aumentaba la carga orgánica, la cantidad de bicarbonato de sodio debía ser suficiente para mantener un rango de alcalinidad de 1000 mg/l y 5000 mg/l como CaCO_3 [9].

El efluente del reactor anaerobio presentó valores de alcalinidad totales comprendidos entre 990 a 2000 mg/l CaCO_3 para una variación de bicarbonato de sodio NaHCO_3 de 0.5-1.0 g/l (Tabla 4), la cual resultó ser menor que la utilizada en el trabajo de Behling [9], el cual estuvo comprendido

entre 0.5 y 3.0 g/l, estudiando un sustrato complejo que contenía dentro de sus constituyentes caseína como proteína. Esto se debió probablemente a que la concentración de amoníaco formado era menor que en este estudio, por lo tanto puede inferirse que la capacidad buffer fue mayor para un reactor trabajando con proteína como sustrato único, tal como fue en este caso.

Remoción orgánica

La DQO en el sustrato se varió desde 1000 mg/l (desde el inicio hasta el día 12), 1500 mg/l (desde el día 13 al 27), 2000 mg/l (desde el día 28 al 43), 3000 mg/l (desde el día 44 al 57) y 4000 mg/l (desde el día 58 al 78). La carga orgánica aplicada al reactor UASB inicial de adaptación fue baja (2.0 Kg DQO/ m^3 d) y la carga orgánica más alta aplicada al reactor fue 8 Kg DQO/ m^3 d. La DQO resultante en el efluente varió de 138.05 a 265.99 mg/l. La eficiencia es presentada en la Figura 4.

Para las dos primeras semanas la remoción fue la más baja, tal como se esperaba, ya que las bacterias anaerobias se estaban adaptando al sustrato proteico; la alcalinidad en este periodo no llegó a superar los 1000 mg/l. En este tiempo de operación del reactor, la remoción de DQO se estabilizó en un 85%, aumentándose la carga orgánica a 3 Kg DQO/ m^3 d, la remoción de DQO en este periodo varió entre 73.4 y 86.2 % (Figura 4). El estado de estabilidad se supone que se alcanza cuando la DQO del efluente y la escala de producción de biogas son constantes (dentro de 1%) por tres días consecutivos [6]. Estas condiciones fueron usadas en esta investigación, para proceder a los cambios de carga orgánica.

La carga orgánica fue incrementada a 3 Kg DQO/ m^3 d, observándose el día 13 una disminución en la eficiencia de remoción de DQO a 70.37%. Sin embargo, cuando la alcalinidad aumentó a 1022 mg/l, el valor del pH fue 6.60. Para el día 20 de experimentación, el reactor se había recuperado y superado los valores de eficiencia de remoción de DQO de la carga anterior, obteniéndose 88.78% para una alcalinidad de 1441 y un pH de 7.10, manteniendo estas condiciones de experimentación hasta el día 27.

La carga orgánica se incrementó de nuevo a 4 KgDQO/ m^3 d entre los días 28 y 43, logrando una remoción máxima de 89.89%. Se observó

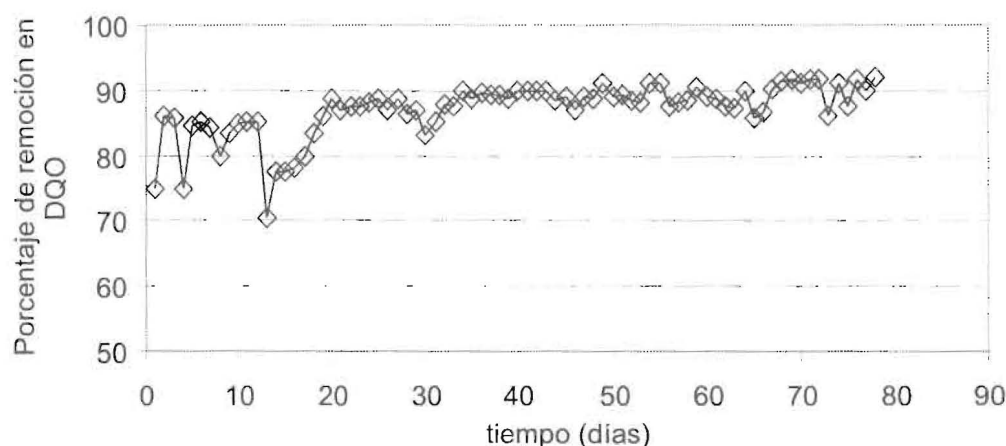


Figura 4. Variación en la eficiencia de remoción en DQO, reactor UASB usando proteína como sustrato.

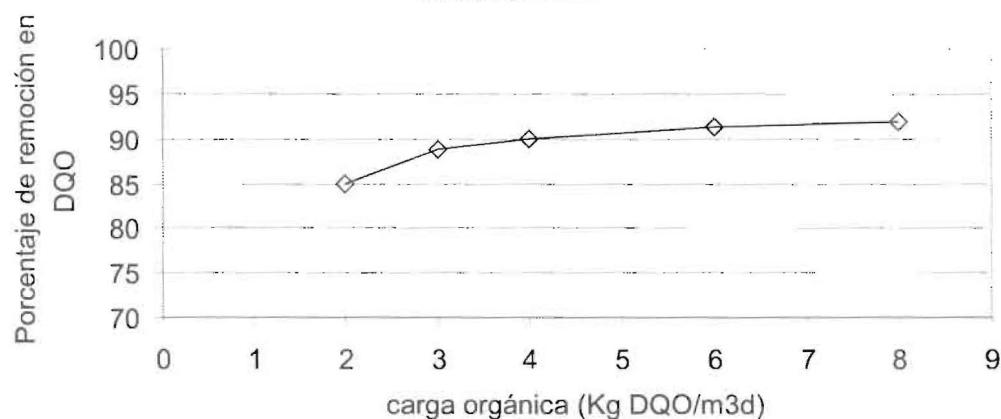


Figura 5. Porcentaje de DQO removida para cada carga orgánica aplicada al reactor UASB utilizando proteína como sustrato.

una mejor adaptación a esta carga que en la anterior, el valor de la alcalinidad en este periodo 1512 mg/l y el pH se mantuvo en 7.20. Debido al buen comportamiento del reactor se incrementó la carga a 6 Kg DQO/m³d, ya que el aumento de 1 Kg DQO/m³d no registraba una diferencia significativa. Para esta nueva carga, se logró una remoción máxima de 91.24% para el día 54 con un valor de alcalinidad de 1930 mg/l y un pH de 7.25.

El día 59 se aumentó la carga orgánica a 8 Kg DQO/m³d (DQO 4000 mg/l), consiguiéndose la mejor remoción el día 78 (91.91%), como puede verse en la Figura 5. La alcalinidad alcanzó un valor de 2000 mg/l y el pH 7.30, dentro de los rangos recomendados por los investigadores [11].

El valor de eficiencia correspondiente a la última carga es comparable con los trabajos de

Fang y Chui [4], en su publicación referida a procesos UASB para tratar agua residual con proteínas hidrolizadas, en donde obtuvieron una eficiencia de remoción de 84-90% sobre un amplio rango de índice de carga orgánica entre 6.7-32.0 Kg DQO/m³d. Yan y colaboradores [12], reportaron una remoción del 97% de la DQO en el tratamiento de suero de queso a una tasa de carga orgánica de 0.9-6.0 Kg DQO/m³d.

Tasas de producción de biogas y contenido de metano en el biogas

Al inicio de la experimentación para la carga orgánica de 2.0 Kg DQO/m³d (1000 mg/l), la producción de biogas fue la más baja, al igual que la cantidad de metano que contenía el biogas, encontrándose valores de 2.28 l/d de biogas y 43% de metano en el mismo (Figuras 6 y 7). Al sexto

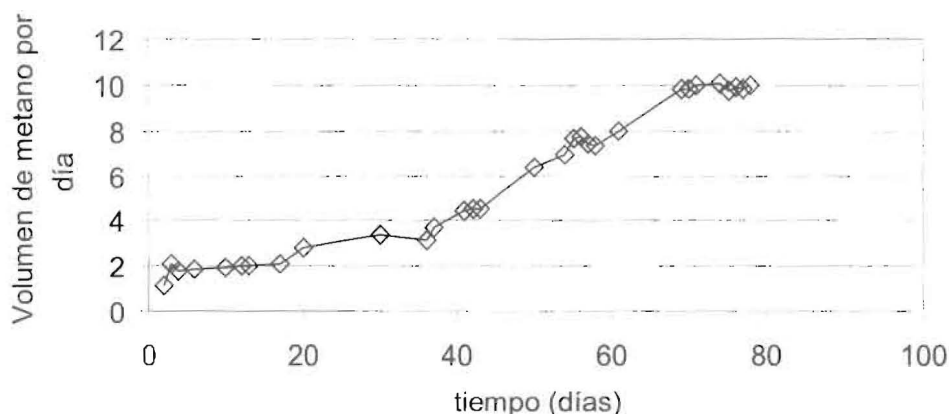


Figura 6. Variación en las tasas de producción de metano (l/d) en el reactor UASB utilizando proteína como sustrato.

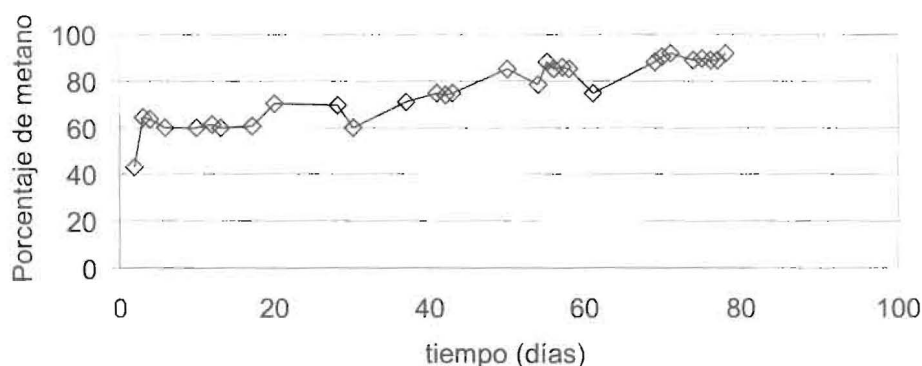


Figura 7. Variación en el porcentaje de metano en el reactor UASB utilizando proteína como sustrato.

día de operación, la producción de metano llegó al 60% con una tasa de biogas de 3.5 l/d en condiciones estándar de presión y temperatura (STP) y una eficiencia de remoción de DQO de 85% donde se consiguieron condiciones de estabilidad.

Cuando la carga orgánica fue de 3 Kg DQO/m³d (DQO 1500 mg/l), inmediatamente la producción de biogas se incrementó, pero manteniendo el porcentaje de metano igual que en los primeros días. El día 13 la eficiencia de remoción de DQO disminuyó a 70.37%, esto es debido al aumento de la carga orgánica. Sin embargo, el día 20 el reactor ya había superado la eficiencia con respecto a la carga anterior, llegando a una producción de biogas de 4.4 l/d (STP) un porcentaje de metano de 70% y una remoción del DQO de 88%.

Cuando el reactor fue sometido a una carga orgánica de 8 Kg DQO/m³d (4000 mg/l), desde el día 59, el comportamiento del reactor fue mucho mejor que en la carga anterior, ya que el porcentaje de metano llegó a 92% y la producción de

biogas a 10.4 l/d (STP) tal y como se observa en la Tabla 5. Las condiciones de estabilidad se logran con una tasa constante de producción de metano a una carga orgánica dada [13].

En la Tabla 6 puede observarse un leve incremento en la producción de metano con respecto a la DQO removida. Estos valores son comparables con los de Yang *et al.* [12], los cuales encontraron tasas de producción de metano de 0.32, 0.34 y 0.33 m³ CH₄/Kg DQO removida en reactores UASB, así como con los de Chacín [13], consiguió valores de 0.33 m³ CH₄/Kg DQO en el tratamiento de un sistema anaerobio de dos fases usando un reactor UASB.

Ácidos Grasos Volátiles (AGV)

Durante el inicio de la experimentación hasta el día 35 se observó una variabilidad entre los valores de ácidos acético, propiónico y butírico con concentraciones de ácido acético (562.7 mg/l a 30.0 mg/l), en propiónico (396.6 mg/l a

4.3 mg/l) y en ácido butírico (491.5 mg/l a 30.6 mg/l) (Figura 8) correspondientes a las cargas de entre 2 y 4 Kg DQO/m³d. Esto coincide con un porcentaje de metano siempre por debajo de 70%, lo cual puede ocurrir debido a que las bacterias acidogénicas crecen más rápidamente que las metanogénicas, de forma tal, que "la velocidad de utilización" del ácido butírico aumenta en relación con la velocidad de utilización del ácido acético.

A partir del día 36 correspondiente a una carga orgánica de 4 Kg DQO/m³ d, y hasta el final de la investigación, existió una disminución gradual de los ácidos grasos hasta valores despreciables en el efluente, coincidiendo con porcentajes de metano mayores al 75%, y valores de alcalinidad mayores de 1500 mg/l CaCO₃, lo cual demuestra que la cantidad de microorganismos capaces de consumir estos ácidos, fue incrementada y con una buena proporción de los mismos.

Al mismo tiempo pudo observarse que a partir de este día las concentraciones de ácido acético, ácido butírico y ácido propiónico fueron disminuyendo, hasta llegar a valores de concentraciones de 20 mg/l. Este valor de ácido graso coincide con un contenido de metano de 92% en el biogas, para una carga orgánica de 8 Kg DQO/m³ d, que se correspondió con la más alta en el reactor UASB para esta investigación. Por lo tanto puede inferirse que casi fueron degradados todos los ácidos grasos por las bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno, transformándo-

Tabla 5
Relación entre la Tasa de Carga Orgánica, Biogas Producido y Porcentaje de Metano en el Biogas

Carga Orgánica KgDQO/m ³ d	Biogas l/d	Metano %
2	3.5	60
3	4.4	70
4	6.3	75
6	8.6	85
8	10.4	92

Tabla 6
Tasas de Producción de Metano por Volumen y por Kg de DQO Removida

Carga Orgánica KgDQO/m ³ d	m ³ CH ₄ /m ³ d Volumen Reactor	m ³ CH ₄ /Kg DQO Removida
2	0.525	0.31
3	0.770	0.30
4	1.181	0.32
6	1.936	0.34
8	2.392	0.34

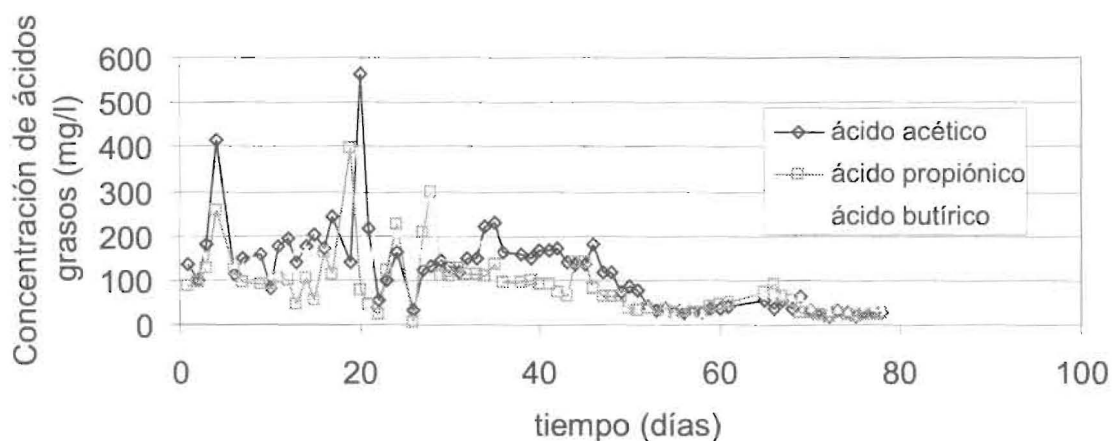


Figura 8. Variación en las concentraciones de ácidos acético, propiónico y butírico (mg/l) en el reactor UASB utilizando proteína.

los a ácido acético y degradados finalmente por las bacterias metanogénicas para formar metano.

Estos resultados son comparables con el trabajo de Fang *et al.* [6] quienes obtuvieron concentraciones de 20 mg/l y menores en ácido acético y propiónico en el efluente, para la degradación de proteínas hidrolizadas en procesos UASB.

Conclusiones

1. El reactor UASB, demostró ser eficiente para tratar agua residual sintética conteniendo proteína (caseína), por obtenerse altos porcentajes de remoción de DQO (73.74-91.91%) y porcentajes de metano en el biogas entre (60-92%), resultados estos indicativos de altos rendimientos para estos sistemas de tratamiento.

2. La mayor eficiencia durante la experimentación se alcanzó cuando se aplicó una carga orgánica de 8 Kg DQO/m³ d (4000 mg/l), donde se obtuvo un porcentaje de remoción de DQO total de 91.91%, porcentaje de metano de 92% y una producción de metano de 0.34 m³ CH₄/Kg DQO removida.

3. Los resultados obtenidos en esta investigación pueden ser usados en la toma de decisiones sobre tratamiento de aguas residuales cuando se trate de efluentes con alto contenido de proteínas, ya que lo demuestran los valores de remoción de materia orgánica y la producción de energía a través de la obtención de gas metano.

Reconocimiento

Este trabajo fue financiado por el consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad del Zulia (CONDES)

Referencias Bibliográficas

1. Young, J. C. Y McCarthy, P.L. "The anaerobic filter for waste treatment". J. Water Pollution Control Federation. 41, (1969), 160-173.
2. Lettinga, G. Y Hulshoff-Pol, L. W. "Advanced reactor de design, operation and economy". Water Sci. Technol. 18(12), (1986), 99-104.
3. Fang, H.H.P., Lui, G., Zhu, J. Y Cai, B. "Treatment of brewery effluent by UASB processes and pollution control". J. Environ. Eng., 116(6), (1990), 454-460.
4. Fang, H.H.P., Chui, H. K., "Maximum COD loading capacity in UASB reactors at 37°C". J. Environ. Eng. 119(1), (1993), 103-119.
5. Speece, R. E. "Anaerobic biotechnology for industrial waste treatment". Environ. Sci. Technol. 17, (1964), 416-427.
6. Fang, H. H. P., Chui, H. K., Li, Y. Y y Chen, T. "Performance and granule characteristics of UASB process treating wastewater with hydrolyzed proteins" Water Sci Technol. 30(8), (1994), 55-63.
7. APHA-AWWA-WPCF, "Standard methods for the examination of water and wastewater". 14th ed., (1975), 501-550.
8. Earl, L. "Ciencia y tecnología sobre pulpa de papel". C.E.C.S.A., (1974), 374-376.
9. Behling, E. "Tratamiento de un Sustrato complejo en un reactor anaerobio de manto de lodo de flujo ascendente (UASB)". Tesis de Postgrado, Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería (1996), 114-114.
10. Lin, K. C. Y Yang, Z., "Technical review on the UASB process" Intern J. Environ. Studies, 39, (1991), 203-222.
11. Polprasert, C. "Organic water recycling". John Wiley and Sons Ltd. Chapter four Biogas Production. (1989), 89-105.
12. Yan, J. Q., Sheng, S., Chiou-Yuan, H. "Anaerobic digestion of cheese whey using up-flow anaerobic sludge blanket reactor" Biological Waste. 27, (1989), 289-301.
13. Chacín, E. D. "Treatment characteristics of two phase anaerobic system using an UASB reactor". PhD Thesis, University of Birmingham, England, (1993), 186-186.

Recibido el 29 de Septiembre de 1998

En forma revisada el 29 de Octubre de 1999